

麻醉术后膈肌功能障碍及超声评估研究进展

鲜俊杰¹, 胡薇², 杜权^{1*}

¹重庆医科大学附属第二医院麻醉科, 重庆 400010; ²重庆医科大学附属大学城医院麻醉科, 重庆 401331

[中图分类号] R614.1 [文献标志码] A [DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.0021.2025.0121

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 鲜俊杰, 胡薇, 杜权. 麻醉术后膈肌功能障碍及超声评估研究进展[J]. 解放军医学杂志, 2025, 50(7): 905-910.

[收稿日期] 2024-01-07 [录用日期] 2024-04-12 [上线日期] 2025-01-21

[摘要] 麻醉、手术和患者本身等多种因素可引起膈肌功能障碍(DD), 导致术后拔管时间延长、脱机失败、肺部并发症(PPCs)等不良事件, 最终导致患者转入重症监护室(ICU)、住院时间延长及死亡率升高等不良结局。因此, 及时准确地评估膈肌功能、合理保护膈肌状态对患者麻醉术后转归至关重要。近年来, 床旁膈肌超声已应用于临床, 主要集中于ICU, 但围手术期针对膈肌功能的评估较少。本文就麻醉术后DD的发生机制及膈肌超声评估的应用进展进行综述, 通过超声检查监测膈肌的静态和动态功能, 实时观察术后膈肌功能的变化及恢复情况, 预测PPCs的发生, 以期制定合理的麻醉手术方案提供指导, 促进靶器官膈肌的功能保护、预康复, 积极防治DD, 促进术后恢复。

[关键词] 呼吸肌; 膈肌功能障碍; 术后肺部并发症; 膈肌超声; 术后肌松残余固化

Research progress of diaphragmatic dysfunction and diaphragmatic ultrasound evaluation following anesthesia and surgery

Xian Jun-Jie¹, Hu Wei², Du Quan^{1*}

¹Department of Anesthesiology, the Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400010, China

²Department of Anesthesiology, University-Town Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 401331, China

*Corresponding author, E-mail: 302896@hospital.cqmu.edu.cn

This work was supported by the Chongqing Studying Abroad Innovation Funding Project (cx2021069), and the Chongqing Science and Health Joint Project (2020MSXM008)

[Abstract] Diaphragmatic dysfunction (DD) can be caused by various factors, including anesthesia, surgery, and patient-related conditions. It may lead to adverse events such as prolonged postoperative extubation, weaning failure, postoperative pulmonary complications (PPCs), which can eventually result in patients being transferred to the intensive care unit (ICU), having an extended hospital stay and an increased mortality rate. Thus, it is crucial that the function of the diaphragm be timely and accurately assessed, and its status be reasonably protected for the favorable outcomes of patients after anesthesia and surgery. Recently, point-of-care diaphragmatic ultrasound has been applied in the clinic. However, currently, the assessment of DD is mainly concentrated in the ICU, and its application during the perioperative period is relatively restricted. In the review, the mechanisms of postoperative DD after anesthesia and the application progress of ultrasonography evaluation are summarized. The static and dynamic functions of the diaphragm are monitored via various ultrasound examination methods, and the postoperative changes and recovery of diaphragm function in each patient are observed in real time. In this way, the occurrence of PPCs can be predicted, a reasonable anesthesia and surgery plan can be guided to be developed, the protection and even prerehabilitation of the target organ "diaphragm" can be promoted, DD can be ultimately prevented and treated in a timely manner, and postoperative recovery can be improved.

[Key words] respiratory muscle; diaphragmatic dysfunction; postoperative pulmonary complications; diaphragmatic ultrasound; postoperative residual curarization

[基金项目] 重庆市出国留学人员创新资助项目(cx2021069); 重庆市科卫联合医学科研项目(2020MSXM008)

[作者简介] 鲜俊杰, 硕士研究生, 主要从事膈肌功能监测方面的研究

[通信作者] 杜权, E-mail: 302896@hospital.cqmu.edu.cn

平静吸气状态下,约70%的肺通气量由膈肌提供,故膈肌是机体最重要的呼吸肌。研究表明,在危重症、肌肉和神经病变时可能累及膈肌中的一个或两个半膈膜,严重时甚至引起膈肌功能障碍(diaphragmatic dysfunction, DD),即膈肌不能产生最大肌力,导致吸气能力降低和呼吸肌耐力受损^[1-4]。膈肌超声相关研究主要集中于重症监护室(intensive care unit, ICU)指导拔管及在神经肌肉疾病中判断膈肌受损的情况,而膈肌超声在围手术期的应用相对较少。麻醉术后DD可引起术后肺部并发症(postoperative pulmonary complications, PPCs)等严重不良事件,致使拔管延迟、脱机失败,影响患者恢复甚至导致患者死亡^[5]。为此,本文综述了DD的发生机制及膈肌超声在麻醉术后的应用进展,以期及时识别、妥善防治DD,促进患者康复。

1 DD的发生机制

膈肌的结构和功能状态对维持正常的呼吸运动具有重要意义,且与术后肺不张、低氧血症、肺炎、肺水肿和呼吸衰竭等影响呼吸系统的并发症(即PPCs)密切相关,术前进行吸气肌训练可减少PPCs的发生^[6]。DD可导致跨膈压(即腹内压与胸内压的差值)降低,影响肺顺应性,降低肺活量、潮气量、功能残气量,还可抑制咳嗽功能,减弱黏液纤毛的清除能力。DD可影响呼吸功能的恢复,严重时会引起膈肌损伤(表现为肌萎缩、无力);膈肌损伤后不易恢复,如ICU获得性膈肌无力(ICU-acquired diaphragmatic weakness)是导致ICU停留时间、住院时间延长以及病死率升高等^[7-8]的重要原因。但麻醉术后DD的具体发生机制尚不清楚,大量研究表明,DD的发生可能与以下几个方面有关。

1.1 患者本身 肌肉状态及功能与年龄、体重指数(body mass index, BMI)、性别相关。患者术前最大膈肌增厚率(diaphragm thickening fraction, DTF)较低时PPCs的发生增加,影响术后恢复(如ICU停留时间及住院时间延长)^[9]。健康肌肉组织中由于纤维组织含量较少,超声回声弱,超声图像呈黑色或接近黑色,随着年龄增长,肌肉中脂肪、纤维组织含量增加,膈肌结构发生变化,超声回声增强,颜色变亮^[10]。老年人常见的进行性骨骼肌质量减少、功能减退的肌少症为衰老的特征性表现,可减小膈肌厚度(diaphragm thickness, DT)并影响其功能。术前合并疾病如神经-肌肉病变、慢性阻塞性肺疾病、心力衰竭等通常伴有肌肉萎缩及肌无力,影响膈肌的功能。膈肌作为易受损的器官,麻醉术后存在影响其结构、功能的多种因素,当与患者本身因素复合作用时,则易导致DD。

1.2 麻醉药 阿片类等全麻药物可降低中枢神经系统对膈肌等呼吸肌肉的运动驱动,通过多种机制抑制觉醒状态,如抑制对缺氧和高碳酸的化学反应、对上呼吸道负压的反射性反应和清醒的程度^[5]。麻醉药抑制呼吸的程度不同,与其对膈肌功能的影响不同相关。手术全麻时常使用肌松药,术毕尽管大部分药物被代谢且使用肌松拮抗药,但全麻患者拔除气管导管后肌松残余比例仍高达60%,且可能持续存在,即术后肌松残余固化(postoperative residual curarization, PORC),这也是术后常见的麻醉危险因素^[11]。另外,过多蓄积的药物可影响术后膈肌功能的恢复,故应避免过量使用麻醉药物。麻醉复苏30 min后,多数患者恢复到基础肌力水平^[12]。肌松拮抗药(如胆碱酯酶抑制剂)不能直接作用于肌松药阻断其效果,过量乙酰胆碱可影响肌肉活性,而PORC的发生与肌松药可较长时间地作用于膈肌影响其活性有关。早期研究发现,在危重病炎症条件下,停用肌松药后肌肉麻痹作用仍可持续数天,表明肌松效应与炎症反应相关,肌松效应延长则进一步影响了膈肌的正常功能^[13]。

1.3 手术 麻醉中长时间机械通气可导致膈肌损伤、萎缩和收缩功能障碍,即通气相关膈肌功能障碍(ventilator-induced diaphragm dysfunction, VIDD)^[14]。胸科术后常发生DD,而胸腔镜下术侧DD的发生率较开放胸科手术明显降低^[15],表明微创手术引起的膈肌损伤及炎症反应较轻,且手术时长也与膈肌损伤有关。有研究测量胸腔镜下肺活检术患者术后12 h术侧膈肌移动度(diaphragmatic excursion, DE)和增厚率,发现非插管全麻者膈肌功能恢复达到97%(插管全麻患者为82%),非手术侧也得到类似结果,分析原因可能与非插管麻醉管理方案中保留自主呼吸、保持膈肌功能、减轻膈肌损伤有关,且非插管麻醉的麻醉药、肌松药使用量较插管麻醉少^[16]。

手术尤其大手术的损伤可引起明显的全身炎症反应,增加机体代谢需求,影响膈肌等呼吸肌的功能。与肢体肌肉相比,麻醉诱导后膈肌中促炎因子如白细胞介素-6(interleukin-6, IL-6)、肿瘤坏死因子- α (tumour necrosis factor- α , TNF- α)等表达水平升高,可促进膈肌纤维蛋白的降解,进而影响膈肌功能^[17]。研究显示,当严重感染引起全身炎症反应时,可导致脓毒症相关膈肌功能障碍(sepsis-induced diaphragm dysfunction, SIDD)^[18],表明炎症反应与DD的发生密切相关。

综上,患者的年龄、BMI、性别、术前肌肉状态、阿片类药物及肌松药等麻醉药物的应用、不同的手术类型及炎症反应等均可影响膈肌的结构和功能,导致DD和PPCs的发生。

2 膈肌超声监测

目前,临床上有多种方式评估膈肌的状态和功能。跨膈压、膈肌肌电图及X线检查等存在有创或辐射等缺点,且不能持续、反复、即时使用,限制了其临床应用。膈肌超声作为新的测量技术受到临床医师的青睐。解剖学中膈肌分为脚膈肌和肋膈肌,后者附于胸前壁的部分在超声下可见。

2.1 常用的膈肌超声评价指标 膈肌超声作为一种操作简单、无辐射、价格合理、非侵入性、可床旁实时动态观察的技术,近年来被广泛应用于临床。膈肌超声的评价指标较为全面,包括静态、动态指标如DT、DTF、DE、膈肌浅快呼吸指数、增厚浅快呼吸指数、收缩速度及对合角度等。

2.1.1 DT、DTF的测量 DT测量时需嘱患者处于平卧或半卧位,选择高频线性探头于腋前线或腋中线第8—9肋间进行探查,超声图像中可观察到3层结构:两条高回声组织为胸膜层和腹膜层,二者之间的低回声区域为膈肌层,DT即胸膜层与腹膜层之间的距离(图1)。有研究发现在B型和M型超声下均可测得DT^[19]。平静呼吸状态下,B型超声检查健康人的DT为0.30(0.12~1.18)cm,与BMI呈明显正相关^[20]。在患者呼吸运动时,可通过检测吸气末膈肌厚度(diaphragmatic thickness at the end of inspiration, DT_{ei})和呼气末膈肌厚度(diaphragmatic thickness at the end of expiration, DT_{ee})计算DTF。DTF(%)=(DT_{ei}-DT_{ee})/DT_{ee}×100%。DTF<20%提示存在膈肌麻痹,DTF为20%~36%则提示存在DD^[21]。

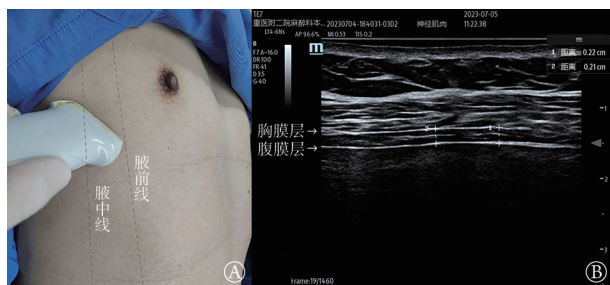


图1 膈肌厚度(DT)的测量示意图(A)和超声影像图(B)
A. 超声探头位于体表腋中线处测量DT; B. 超声下DT示意图,胸膜层及腹膜层之间的低回声区域为膈肌

图1 膈肌厚度(DT)的测量示意图(A)和超声影像图(B)
Fig. 1 Measurement of diaphragmatic thickness (DT) (A) and ultrasound image (B)

2.1.2 DE的测量 膈肌在呼吸周期中移动的距离为DE。测量DE时需嘱患者处于平卧位,使用3.5~5.0MHz低频凸阵探头沿肋缘下置于锁骨中线或腋前线进行测量,在B型超声模式下,以肝或脾为声学窗,膈肌表现为一条高回声亮线。患者呼吸时还可使用M型超声获得膈肌移动轨迹的正弦曲线,通过

测量垂直轴上基线到最高点的距离,即测得DE(图2)。Boussuges等^[22]发现,健康男性、女性平静呼吸时DE为(1.8±0.3)cm、(1.6±0.3)cm,深呼吸时为(7.0±0.6)cm、(5.7±1.0)cm;男女性左、右侧DE无明显差异。研究发现,测量DE时右半侧肝窗口更为直观^[23]。DE为代偿状态下单侧膈肌麻痹的常用识别指标,当患者处于机械通气状态时,DE代表作用于同一个方向上的两个力(即膈肌自身的收缩力和呼吸机施加的压力)的总和,此时呼吸机产生的压力导致膈肌发生被动位移,通常认为当DE<1cm时存在DD。一项纳入21例感染COVID-19后幸存者的研究发现,16例(76%)至少存在一种膈肌结构或功能的超声异常,表明DD可能导致症状加重或恢复缓慢^[24]。

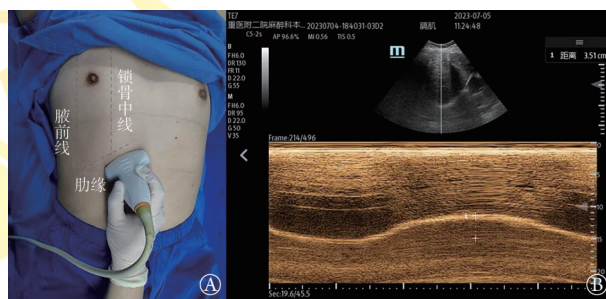


图2 膈肌移动度(DE)的测量示意图(A)和超声影像图(B)
Fig. 2 Measurement of diaphragmatic excursion (DE) (A) and ultrasound image (B)

2.2 膈肌回声强度测定 DT、DE并不能反映膈肌结构的变化。随着年龄增长,膈肌的回声强度也增加。膈肌肌束急性损伤是导致DD发生的早期因素,脂肪、纤维组织替代炎性、坏死的肌组织,膈肌结构发生变化导致超声回声强度增加。有研究测定机械通气早期的膈肌回声强度发现,较长时间通气后膈肌回声强度增加,因此膈肌回声强度可作为一种新的超声评价指标,定量反映膈肌肌束损伤的程度^[25]。具体测量方法:在超声仪重新启动后获得B模式图像,预设默认值(34 Hz,深度5 cm,增益50,焦距2.8 cm,时间-增益补偿50%),标准化超声测量的增益、频率;通过ImageJ软件进行灰度直方图分析定量回声强度,以示踪法确定数值范围,生成所选区域的灰度频率柱状图。有研究在腹部大手术后入住ICU的患者中发现,膈肌超声回声强度的增加与PPCs相关,且可预测PPCs的发生^[26]。

2.3 其他 健康人的DTF与跨膈压(代表膈肌功能)具有一定相关性,但机械通气患者的DTF与跨膈压的相关性较差^[27],分析原因可能与膈肌的电活性难以反映膈肌产生的力量有关。跨膈压并不是一种实际压力,而是由膈肌收缩引起的压力变化。此外,膈肌各个部位的力量不同,超声观测并不能完全反

映膈肌的功能,且不同测量者测量的DTF也存在差异。因此,应联合其他超声方法以进一步促进膈肌功能的无创监测。

剪切波弹性成像可反映膈肌的硬度及力学性能。研究显示,剪切波弹性成像与机械通气时的DTF、跨膈压相关^[28]。常用的膈肌超声测量方法在2D条件下仅能测定肌纤维收缩的横向方向上的膈肌组织变形,而斑点示踪成像可观察到肌纤维收缩方向上的运动情况,与肌肉变形和变形速度近似,甚至可评价健康个体的膈肌收缩性能^[29]。此外,还有其他超声观测方法,如组织多普勒成像、超快超声成像等。

3 膈肌超声监测技术的应用进展

近年来,膈肌超声的临床应用得到越来越多研究者的认可。Parada-Gereda等^[3]通过Meta分析发现DTF可预测机械通气后撤机的成功率,对患者脱机起到指导作用。麻醉ICU患者通常因其他全身性疾病、术中条件不佳、高龄和术后不良事件等发生严重并发症,而膈肌超声联合肌松监测可预测此类患者拔管后出现的不良呼吸事件,有利于减轻疼痛、提高舒适度以及最大限度减少术后并发症的发生^[30]。膈肌超声在急诊医学和成人重症监护中的应用也逐渐增多,并已用于评估成人及儿童的膈肌功能,但其在儿科重症监护中的应用仍少见。Weber等^[31]发现,快速、无创和可重复的床旁膈肌超声评估策略可有效预防呼吸机诱导产生的DD,并有助于患者成功脱机和拔管。

另外,膈肌超声还被证实可辅助诊断疑难疾病,如可用于评估I型脊髓性肌萎缩症儿童的膈肌功能和牵伸性,描述其特征性运动障碍(肌无力和肌萎缩),以协助临床诊断和治疗^[32];还可替代肺功能检查,评估肌萎缩性侧索硬化症的呼吸功能,且适用于患者的晚期诊疗,对患者参与度要求不高,具有较高的应用价值^[33]。

4 DD的防治

尽管采取肺保护性通气等多种策略,但目前PPCs的发生率仍较高,尤其是在大手术后1周内死亡的患者中近25%与PPCs有关。因此,进行膈肌保护及防治其功能障碍具有重要临床意义。

4.1 麻醉用药及管理 新型肌松拮抗药舒更葡糖钠不易引起PORC。大型非心脏手术STRONGER研究发现,当使用舒更葡糖钠拮抗肌松后,患者膈肌等呼吸肌肌力恢复更完全、迅速,PPCs的发生率也明显降低^[34]。膈肌超声为识别PORC提供了一种可行的测量方法,对于判断麻醉术后膈肌功能的恢复具有重要意义。

区域阻滞麻醉不仅可提供较静脉注射阿片类药物更好的、整体的疼痛控制,还可改善膈肌活动。有研究发现,急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)母羊羔采用限制性输液策略进行管理时,其氧合状况和膈肌收缩能力均得到潜在改善,原因可能与改善膈肌微循环、增强膈肌肌肉接头突触传递并最终降低跨膈压有关^[35]。

4.2 防治DD的通气策略及药物 机械通气时间较长时应注意采取膈肌保护性通气策略^[33]以维持膈肌处于最佳负荷水平。研究发现, α_2 受体激动剂右美托咪定可减轻大鼠骨骼肌的缺血-再灌注损伤,对脓毒症诱导的大鼠膈肌损伤也具有保护作用^[36]。与经典麻醉药戊巴比妥相比,右美托咪定虽可降低膈肌收缩力,增加膈肌蛋白氧化,但不会引起机械通气大鼠膈肌萎缩^[37]。目前临床上仍缺少有效的药物防治膈肌无力。有研究显示,N-乙酰半胱氨酸可抑制机械通气诱导的大鼠膈肌氧化应激和蛋白水解^[44],线粒体自由基清除剂SS-31、Mito-TEMPOL可预防动物脓毒症后发生DD^[38]。研究发现,介导肌肉蛋白降解的关键分子MuRF1的抑制剂(MyoMed-205)可防止大鼠膈肌废用后的早期萎缩及收缩功能障碍^[39],该抑制剂有可能成为保护膈肌及预防大手术后呼吸功能不全等PPCs的重要治疗药物。

4.3 膈肌神经电刺激 膈肌神经电刺激是指通过功能性电刺激膈神经引起膈肌收缩,达到改善通气的目的,无需患者配合,可直接产生不自主的肌肉收缩。膈肌神经电刺激方法包括经静脉、皮下或直接刺激膈神经游离段。机械通气时维持膈肌收缩可减轻膈肌萎缩以及呼吸机引起的肺损伤,因此膈肌保护与肺保护性通气策略联用有利于抑制正压通气导致的心输出量减少和抑制机械通气引起的中枢神经炎症^[40]。有研究表明,经皮膈肌电刺激还有助于增加机械通气患者膈肌DTF及改善最大吸气肌压^[41]。临床上通过膈肌超声可监测神经电刺激后膈肌的运动情况。

4.4 膈肌等吸气肌训练 术前呼吸理疗作为预康复(pre-rehabilitation)的重要措施,可减少PPCs的发生。吸气肌训练是一种有效的促进呼吸肌力量及耐力的训练方法,其良好的训练效果可能与膈肌功能改善相关,而膈肌超声可显示其训练效果。老年患者术前可能合并多种慢性病,而PPCs常被忽略,PPCs是影响术后恢复的关键因素^[42]。采用膈肌超声监测、指导老年患者预康复及大手术后康复具有重要的临床意义。

5 总结与展望

围手术期麻醉中多种因素可损伤膈肌而导致

DD, 影响患者术后康复和转归。床旁膈肌超声可实时测量膈肌的形态、活动和结构指标, 从而即时、准确地识别DD, 这为患者术后快速康复提供了新的思路。手术麻醉后膈肌功能恢复延迟常与呼吸系统并发症有关, 而围手术期可通过超声监测, 指导和促进膈肌功能恢复。但膈肌超声在实际应用中仍存在一定局限性。由于判断DD有相应的截断值, 而超声探头分辨率有限, 且不同操作者的测量和判断存在一定差异, 患者间也存在个体差异, 因此有必要统一设备设置及标准化测量方法。通过统一设备及改进方法, 膈肌超声可动态反映患者术前、术后膈肌的变化, 判断膈肌功能的恢复程度以及DD治疗(如膈肌神经电刺激等)的效果。因此膈肌超声仍是未来的研究热点之一。

【参考文献】

- [1] Dres M, Demoule A. Monitoring diaphragm function in the ICU[J]. *Curr Opin Crit Care*, 2020, 26(1): 18-25.
- [2] Faysoil A, Behin A, Ognà A, *et al.* Diaphragm: pathophysiology and ultrasound imaging in neuromuscular disorders[J]. *J Neuromuscul Dis*, 2018, 5(1): 1-10.
- [3] Parada-Gereda HM, Tibaduiza AL, Rico-Mendoza A, *et al.* Effectiveness of diaphragmatic ultrasound as a predictor of successful weaning from mechanical ventilation: a systematic review and meta-analysis[J]. *Crit Care*, 2023, 27(1): 174.
- [4] 叶婷, 肖华平. 肺保护性通气策略及膈肌保护的关键问题[J]. *解放军医学杂志*, 2023, 48(11): 1276-1286.
- [5] Sasaki N, Meyer MJ, Eikermann M. Postoperative respiratory muscle dysfunction: pathophysiology and preventive strategies[J]. *Anesthesiology*, 2013, 118(4): 961-978.
- [6] Chandler D, Mosieri C, Kallurkar A, *et al.* Perioperative strategies for the reduction of postoperative pulmonary complications[J]. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol*, 2020, 34(2): 153-166.
- [7] Mccool FD, Tzelepis GE. Dysfunction of the diaphragm[J]. *N Engl J Med*, 2012, 366(10): 932-942.
- [8] Bertoni M, Piva S, Beretta A, *et al.* Occurrence and effects on weaning from mechanical ventilation of intensive care unit acquired and diaphragm weakness: a pilot study[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2022, 9: 930262.
- [9] Cavayas YA, Eljaiek R, Rodrigue É, *et al.* Preoperative diaphragm function is associated with postoperative pulmonary complications after cardiac surgery[J]. *Crit Care Med*, 2019, 47(12): e966-e974.
- [10] van Doorn JLM, Wijntjes J, Saris CGJ, *et al.* Association of diaphragm thickness and echogenicity with age, sex, and body mass index in healthy subjects[J]. *Muscle Nerve*, 2022, 66(2): 197-202.
- [11] Carvalho H, Verdonck M, Cools W, *et al.* Forty years of neuromuscular monitoring and postoperative residual curarisation: a meta-analysis and evaluation of confidence in network meta-analysis[J]. *Br J Anaesth*, 2020, 125(4): 466-482.
- [12] Huang C, Wang X, Gao S, *et al.* Sugammadex versus neostigmine for recovery of respiratory muscle strength measured by ultrasonography in the postextubation period: a randomized controlled trial[J]. *Anesth Analg*, 2023, 136(3): 559-568.
- [13] Segredo V, Caldwell JE, Matthay MA, *et al.* Persistent paralysis in critically ill patients after long-term administration of vecuronium[J]. *N Engl J Med*, 1992, 327(8): 524-528.
- [14] Dres M, Demoule A. Beyond ventilator-induced diaphragm dysfunction: new evidence for critical illness-associated diaphragm weakness[J]. *Anesthesiology*, 2019, 131(3): 462-463.
- [15] Spadaro S, Grasso S, Dres M, *et al.* Point of care ultrasound to identify diaphragmatic dysfunction after thoracic surgery[J]. *Anesthesiology*, 2019, 131(2): 266-278.
- [16] Steinberg I, Bisciaio A, Rosboch GL, *et al.* Impact of intubated vs. non-intubated anesthesia on postoperative diaphragmatic function: results from a prospective observational study[J]. *Front Physiol*, 2022, 13: 953951.
- [17] Demoule A, Divangahi M, Yahiaoui L, *et al.* Endotoxin triggers nuclear factor-kappaB-dependent up-regulation of multiple proinflammatory genes in the diaphragm[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2006, 174(6): 646-653.
- [18] Supinski GS, Wang L, Schroder EA, *et al.* SS31, a mitochondrially targeted antioxidant, prevents sepsis-induced reductions in diaphragm strength and endurance[J]. *J Appl Physiol (1985)*, 2020, 128(3): 463-472.
- [19] Kalin BS, Gürsel G. Does it make difference to measure diaphragm function with M mode (MM) or B mode (BM)? [J]. *J Clin Monit Comput*, 2020, 34(6): 1247-1257.
- [20] Faysoil A, Mansencal N, Nguyen LS, *et al.* Diaphragm ultrasound in cardiac surgery: state of the art[J]. *Medicines (Basel)*, 2022, 9(1): 5.
- [21] Dubé BP, Dres M. Diaphragm dysfunction: diagnostic approaches and management strategies[J]. *J Clin Med*, 2016, 5(12): 113.
- [22] Boussuges A, Gole Y, Blanc P. Diaphragmatic motion studied by m-mode ultrasonography: methods, reproducibility, and normal values[J]. *Chest*, 2009, 135(2): 391-400.
- [23] Goligher EC, Laghi F, Detsky ME, *et al.* Measuring diaphragm thickness with ultrasound in mechanically ventilated patients: feasibility, reproducibility and validity[J]. *Intensive Care Med*, 2015, 41(4): 642-649.
- [24] Farr E, Wolfe AR, Deshmukh S, *et al.* Diaphragm dysfunction in severe COVID-19 as determined by neuromuscular ultrasound[J]. *Ann Clin Transl Neurol*, 2021, 8(8): 1745-1749.
- [25] Coiffard B, Riegler S, Sklar MC, *et al.* Diaphragm echodensity in mechanically ventilated patients: a description of technique and outcomes[J]. *Crit Care*, 2021, 25(1): 64.
- [26] Fu X, Wang Z, Wang L, *et al.* Increased diaphragm echodensity correlates with postoperative pulmonary complications in patients after major abdominal surgery: a prospective observational study[J]. *BMC Pulm Med*, 2022, 22(1): 400.
- [27] Poulard T, Bachasson D, Fossé Q, *et al.* Poor correlation between diaphragm thickening fraction and transdiaphragmatic pressure in mechanically ventilated patients and healthy subjects[J]. *Anesthesiology*, 2022, 136(1): 162-175.
- [28] Aarab Y, Flatres A, Garnier F, *et al.* Shear wave elastography, a new tool for diaphragmatic qualitative assessment: a translational study[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2021, 204(7): 797-806.
- [29] Fritsch SJ, Hatam N, Goetzenich A, *et al.* Speckle tracking ultrasonography as a new tool to assess diaphragmatic function: a feasibility study[J]. *Ultrasonography*, 2022, 41(2): 403-415.
- [30] Huang L, Xia B, Cheng L, *et al.* Use of a combination of

- diaphragmatic ultrasound and muscle relaxation monitoring in predicting post-extubation adverse respiratory events among elderly patients in an anesthesia intensive care unit[J]. *BMC Pulm Med*, 2023, 23(1): 503.
- [31] Weber MD, Lim JKB, Glau C, *et al*. A narrative review of diaphragmatic ultrasound in pediatric critical care[J]. *Pediatr Pulmonol*, 2021, 56(8): 2471-2483.
- [32] Buonsenso D, Berti B, Palermo C, *et al*. Ultrasound assessment of diaphragmatic function in type 1 spinal muscular atrophy[J]. *Pediatr Pulmonol*, 2020, 55(7): 1781-1788.
- [33] Rajula RR, Saini J, Unnikrishnan G, *et al*. Diaphragmatic ultrasound: prospects as a tool to assess respiratory muscle involvement in amyotrophic lateral sclerosis[J]. *J Clin Ultrasound*, 2022, 50(1): 131-135.
- [34] Kheterpal S, Vaughn MT, Dubovoy TZ, *et al*. Sugammadex versus neostigmine for reversal of neuromuscular blockade and postoperative pulmonary complications (stronger): a multicenter matched cohort analysis[J]. *Anesthesiology*, 2020, 132(6): 1371-1381.
- [35] Khemani RG. Fluid balance: another variable to consider with diaphragm dysfunction?[J]. *Anesthesiology*, 2022, 136(5): 672-674.
- [36] Wu J, Li ST. Dexmedetomidine may produce extra protective effects on sepsis-induced diaphragm injury[J]. *Chin Med J (Engl)*, 2015, 128(10): 1407-1411.
- [37] Breuer T, Bleilevens C, Rossaint R, *et al*. Dexmedetomidine impairs diaphragm function and increases oxidative stress but does not aggravate diaphragmatic atrophy in mechanically ventilated rats[J]. *Anesthesiology*, 2018, 128(4): 784-795.
- [38] Supinski GS, Wang L, Schroder EA, *et al*. MitoTEMPO, a mitochondrial targeted antioxidant, prevents sepsis-induced diaphragm dysfunction[J]. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol*, 2020, 319(2): L228-L238.
- [39] Ribeiro F, Alves PKN, Bechara LRG, *et al*. Small-molecule inhibition of MuRF1 prevents early disuse-induced diaphragmatic dysfunction and atrophy[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(4): 3637.
- [40] Etienne H, Morris IS, Hermans G, *et al*. Diaphragm neurostimulation assisted ventilation in critically ill patients[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2023, 207(10): 1275-1282.
- [41] Medrinal C, Machefert M, Lamia B, *et al*. Transcutaneous electrical diaphragmatic stimulation in mechanically ventilated patients: a randomised study[J]. *Crit Care*, 2023, 27(1): 338.
- [42] Carr ZJ, Siller S, Mcdowell BJ. Perioperative pulmonary complications in the elderly: the forgotten system[J]. *Clin Geriatr Med*, 2023, 41(3): 531-548.

(责任编辑: 纪方方)

解放军医学杂志®